ارزیابی دقت روش طیف ظرفیت و روش طیف ظرفیت بهبودیافته در تعیین عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی*

(یادداشت پژوهشی)

مهدی ایزدپناه[۱]   علیرضا حبیبی[۲]

چکیده *تعیین عملکرد لرزه‌ای، یکی از مهم‌ترین موضوعات در مهندسی زلزله می‌باشد. بدین منظور، تاکنون چندین روش توسعه و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی دو روش«طیف ظرفیت» و«طیف ظرفیت بهبود یافته» در تعیین عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح می‌باشد. بدین‌منظور، چند قاب انتخاب شد و تحت اثر رکوردهای زلزله‌ی مختلف، عملکرد لرزه‌ای آن‌ها با دو روش مزبور ارزیابی گردید. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که هر دو روش طیف ظرفیت و طیف ظرفیت بهبودیافته، تخمینی دست پایین از تغییرمکان را در ارزیابی سطوح عملکردی ارائه می‌کنند هم‌چنین براساس نتایج به‌دست آمده، روش طیف ظرفیت بهبودیافته دارای دقت به‌مراتب مناسب‌تری، نسبت به روش طیف ظرفیت می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی عملکرد لرزه‌ای، روش طیف ظرفیت، روش طیف ظرفیت بهبودیافته، شکل‌پذیری.

Evaluation of accuracy of capacity spectrum and improved capacity spectrum methods for determination of performance of concrete frames

M. Izadpanah   A.R. Habibi

Abstract *Performance seismic evaluation is an important topic in earthquake engineering. In this regard, several methods have previously been developed and used. The main objective of present research is to evaluate two methods including "Capacity Spectrum Method (CSM)" and "Improved Capacity Spectrum Method (ICSM)" in determination of seismic performance of concrete frames. For this purpose, several sample frames are subjected to several different earthquake records, seismic performance of them are evaluated using these two methods. It was demonstrated that CSM and ICSM methods underestimate displacement at seismic performance level. Based on the numerical results of this study, it was concluded that the ICSM method is more accurate than the CSM Method.*

Keywords Concrete frames, Capacity spectrum method, Improved capacity spectrum method, Ductility, Seismic performance.

★تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۸/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۱/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کنگاور، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، کنگاور.

(۲) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان.

مقدمه

امروزه به‌خوبی مشخص شده است که سازه‌های طراحی‌شده بر اساس ضوابط موجود، در برابر زلزله‌های شدید متحمل خسارات سنگین خواهند شد. از این‌رو ارزیابی عملکرد لرزه‌ای این‌گونه سازه‌ها از موضوعات مهمی است که به آن پرداخته شده است. تعیین عملکرد در دستورالعمل ATC40 [1] براساس به‌کارگیری منحنی ظرفیت سازه به شکل خاصی است که روش طیف ظرفیت نامیده می‌شود. این روش ابتدا توسط فریم [2] توسعه پیدا کرد. یو و همکاران [3] این روش را با استفاده از نتایج تحلیل بارافزون و طیف نیاز الاستیک بیان کردند. حبیبی و همکاران با استفاده از این روش به ارزیابی عملکرد قاب‌های خمشی بتن مسلح با استفاده از اندیس خسارت سختی پرداختند[4]. گنکتورک و الناشی در تحقیق خود پاسخ لرزه‌ای قاب‌های چوبی را با استفاده از روش طیف ظرفیت و مقایسه‌ی آن با نتایج کارهای آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند[5]. لین و چانگ به مقایسه‌ی روش ضرایب تغییرمکان و طیف ظرفیت با نتایج آزمایشگاهی، برای ستون‌های بتن مسلح پرداختند[6]. آکار و میراندا به ارزیابی آماری روش‌های تقریبی محاسبه‌ی عملکرد پرداختند [7].

برترو و رین‌هرن [8,9] و فایفر [10] استفاده از طیف غیرالاستیک را در روش طیف ظرفیت پیشنهاد کردند. چوپرا و گوئل در سال ۱۹۹۹ روش طیف ظرفیت بهبود یافته را با استفاده از این طیف ارائه نمودند [11]. نسیم کاشاتارات و همکاران نشان دادند استفاده از این دو روش برای پل‌های بزرگراهی، سطوح عملکرد متفاوتی را نتیجه می‌دهد [12].

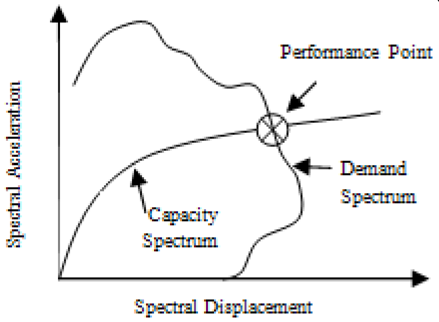
مطالعه‌ی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که با وجود کاربرد زیاد روش طیف ظرفیت در تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، تحقیقات بسیار محدودی در مورد ارزیابی دقت این روش وجود دارد. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی دقت روش‌های طیف ظرفیت و طیف ظرفیت بهبود یافته با استفاده از مدل‌سازی غیرخطی قاب‌های بتنی در حالت دینامیکی و استاتیکی می‌باشد.

روش طیف ظرفیت و روش طیف ظرفیت بهبود یافته

در این روش نقطه‌ی عملکرد باید دو شرط زیر را هم‌زمان ارضا کند:

۱. نقطه باید روی طیف ظرفیت قرار گیرد.

۲.نقطه باید روی طیف تقاضای غیرخطی قرار گیرد شکل(۱).



شکل ۱ نقطه‌ی عملکرد در روش طیف ظرفیت

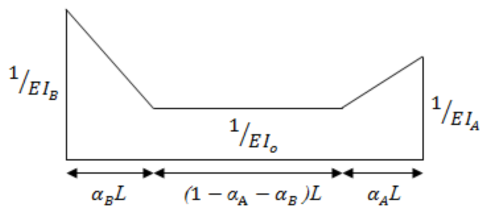
یکی از مهم‌ترین مسائل در روش طیف ظرفیت تخمین میرایی مؤثر سازه در حالت غیرخطی و تهیه‌ی طیف نیاز کاهش یافته می‌باشد. با انجام تحلیل بارافزون و افزایش تدریجی بار جانبی، سازه وارد فاز غیرخطی می‌شود و سختی آن تغییر می‌کند. در هر نقطه از منحنی ظرفیت با استفاده از روابط موجود در مراجع(۱۱ و ۱) ، میرایی معادل، دوره‌ی تناوب و سایر پارامترهای مورد نیاز محاسبه می‌شوند. به این منظور لازم است منحنی ظرفیت با یک منحنی دو خطی جایگزین گردد به‌گونه‌ای که سطح زیر دو منحنی، یکسان باشد. محل تلاقی دو خط در منحنی دو خطی، نقطه‌ی تسلیم سازه می‌باشد که در روابط مربوط به میرایی و پریود، مشخصات این نقطه مورد نیاز است[1].

در روش طیف ظرفیت بهبود یافته که توسط چوپرا و گوئل [11] در سال ۱۹۹۹ مطرح گردید، استفاده از طیف پاسخ با شکل‌پذیری ثابت به‌جای استفاده از میرایی معادل پیشنهاد شد. محاسبه‌ی طیف

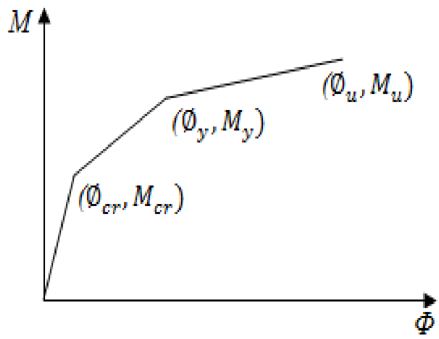
غیرالاستیک در این روش بسیار مشکل‌تر از تخمین آن با میرایی معادل می‌باشد به‌طوری‌که در محاسبه‌ی این طیف، برای هر پریود لازم است یک تحلیل دینامیکی خطی و چندین تحلیل الاستوپلاستیک غیرخطی انجام شود. روند گام‌به‌گام محاسبه‌ی این طیف در مرجع [13] آمده است.

تحلیل غیرخطی سازه

در این تحقیق برای انجام کلیه‌ی تحلیل‌ها از نرم‌افزار IDARC V6.1 استفاده شده است[14] که نرم‌افزاری بسیار توانمند در تحلیل غیرخطی سازه‌ها می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مسائل در تحلیل سازه‌های بتنی، مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضا می‌باشد. در این نرم‌افزار امکان استفاده از مدل پلاستیسیته‌ی گسترده فراهم آمده است. در شکل (۲) مدل توزیع نرمی در طول یک المان بتنی که به‌صورت خطی فرض می‌شود، نشان داده شده است. به‌منظور افزایش دقت نتایج تحلیل غیرخطی، از یک مدل سه خطی لنگر- انحنا مطابق با شکل (۳) استفاده می‌شود.



شکل ۲ نحوه‌ی توزیع نرمی در مدل غیرخطی



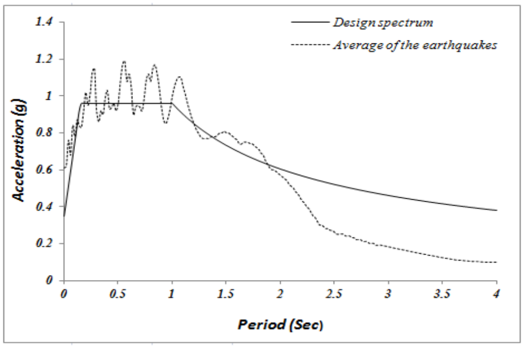
شکل ۳ منحنی لنگر- انحنای سه‌خطی

تحلیل بار افزون. تحلیل بارافزون(Pushover Analysis) یکی از روش‌های مؤثر در تحلیل غیرخطی سازه‌هاست که در دو دهه‌ی اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این روش که به تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز معروف است، نیروی جانبی ناشی از زلزله به‌صورت یک الگوی بارگذاری مشخص به‌طور گام‌به‌گام افزایش می‌یابد تا اعضای سازه‌ای به‌تدریج وارد مرحله‌ی تسلیم شوند. تاکنون الگوهای متنوعی برای نحوه‌ی توزیع بارجانبی پیشنهاد شده است. الگوی بارگذاری انتخاب شده در این تحقیق، الگوی توانی است که توسط استاندارد FEMA273 توصیه شده است و در آن اثرات مدهای ارتعاشی بالاتر تا حدودی منظور می‌گردد [15].

تحلیل دینامیکی غیرخطی. این روش یکی از روش‌های پیچیده در تعیین نقطه‌ی عملکرد سازه می‌باشد. در این روش، سختی و سایر مشخصه‌های سازه در هر لحظه زمانی اصلاح می‌شود و پاسخ غیرخطی سازه محاسبه می‌گردد. از موارد مهم در این تحلیل انتخاب یک منحنی هیسترزیس مناسب برای نیروی بازگرداننده می‌باشد. مدل هیسترزیس انتخاب شده در این تحقیق مدل هیسترزیس پیشنهادی پارک در نرم‌افزار IDARC است [14] که در آن می‌توان کاهش سختی و مقاومت را به‌خوبی مدل کرد. ضرایب مدل در این تحقیق به‌گونه‌ای انتخاب شده است که متناظر با کاهش متوسط در نرم‌افزار IDARC است [14]. در این مدل کاهش مقاوت و سختی و ... مدل شده است. هم‌چنین انتخاب گام زمانی مناسب در این تحلیل، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد، چرا که انتخاب گام زمانی نامناسب اغلب منتهی به نیروهای نامتعادل بزرگ می‌شود و مشکلاتی را در مدل‌سازی هیسترزیس ایجاد می‌کند و می‌تواند سبب ناپایداری عددی در برنامه گردد [14]. تحقیق حاضر، برای انجام این تحلیل از روش نیومارک و ترکیب آن با روش شبه نیرو انجام می‌شود [14].

نتایج عددی

در این قسمت به‌منظور بررسی دقت روش‌های غیرخطی مورد نظر، تعداد پنج قاب بتن مسلح به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که طیف قابل توجهی از قاب‌های بتنی با تعداد طبقات و پریودهای مختلف را پوشش دهد. مثال اول مورد بررسی یک قاب سه‌طبقه و دو دهانه و چهار مثال بعدی دارای تعداد طبقات ۵، ۸، ۱۲و۱۵ و ٤ دهانه می‌باشند که در آن‌ها ارتفاع هرطبقه ۳ متر و طول دهانه‌ها ٤ متر می‌باشد. کلیه‌ی قاب‌ها در بستر آبرفتی و برای منطقه با خطرپذیری خیلی زیاد (قاب خمشی بتنی ویژه) طبق استاندارد ۲۸۰۰ [16] بارگذاری و طبق آئین‌نامه‌ی آبا طراحی شده‌اند. نتایج تحلیل بارافزون قاب‌های انتخابی در مراجع [4,17] نیز موجود می‌باشد. به‌منظور ارزیابی سطوح عملکردی مختلف، زلزله‌های متفاوتی در نظر گرفته شده‌اند. دراین راستا چهار زلزله‌ی معروف دنیا شامل ال سنترو ۱۹٤۰، کوبه ۱۹۹۵، نورتریج ۱۹۹٤ و طبس ۱۹۷۸ مورد نظر قرار گرفته‌اند. این زلزله‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که متناسب با بستر قاب‌ها باشند و سپس با استفاده از نرم‌افزار seismomatch به‌صورت متناسب با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰، اصلاح گردیدند. به‌طور مثال برای قاب شماره‌ی ۲، ۱۰ رکورد از ایستگاه‌های مختلف زلزله‌ی نورتریج مربوط به بستر آبرفتی انتخاب شدند و نهایتاً طیف میانگین رکوردهای اصلاح شده که در تحلیل‌های این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، به‌صورت شکل (٤) به‌دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طیف میانگین حدوداً تا دوره‌ی تناوب ۲، کم‌ترین اختلاف را با طیف طرح دارد. برای قاب مورد نظر، محدوده‌ی ۰/۲ تا ۱/۵ برابر دوره‌ی تناوب اصلی، در همین محدوده است. در واقع در تحقیق حاضر سعی شده رکوردها کم‌ترین عدم انطباق را از نظر سطح انرژی، مدت زمان حرکات شدید زمین، محتوای فرکانسی و ... با طیف طرح داشته باشند. برای سایر قاب‌ها نیز همین فرآیند انجام شده است و تنها تفاوت آن مربوط به تغییر زلزله‌ی وارد بوده است.

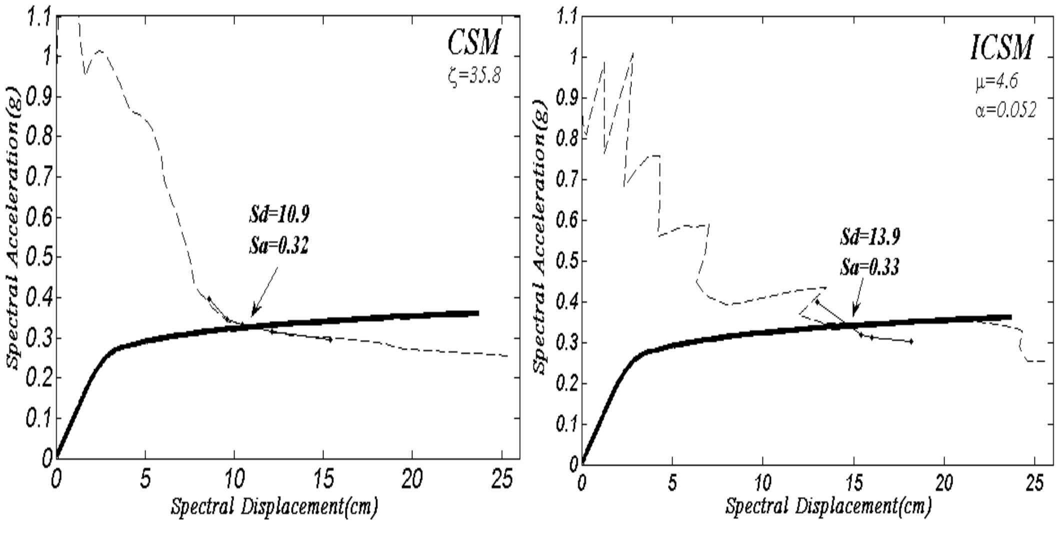


شکل ٤ طیف طرح و طیف میانگین رکوردهای زلزله‌ی نورتریج

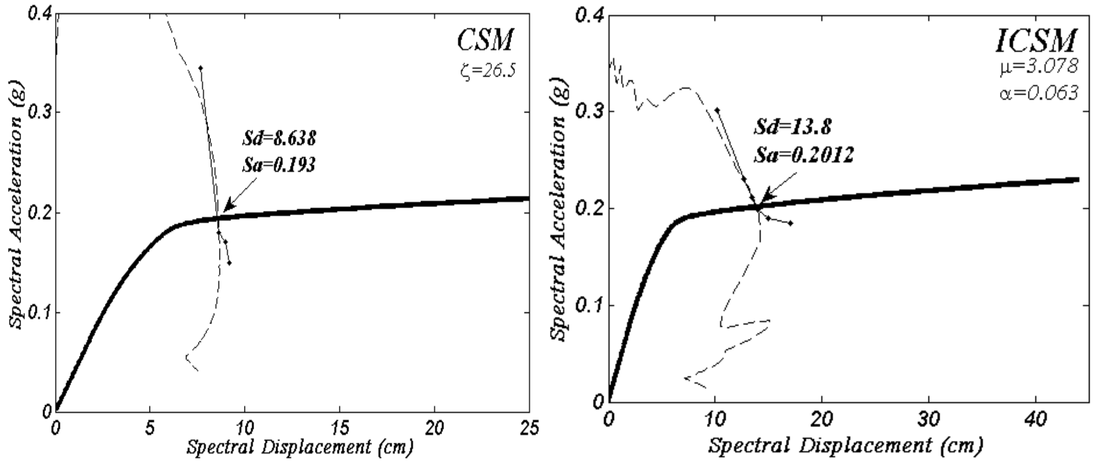
قاب‌های مورد نظر با دو روش استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی تحلیل شدند. در روش استاتیکی غیرخطی پس از به‌دست آوردن منحنی ظرفیت هر یک از قاب‌ها، نقطه‌ی عملکرد آن‌ها با استفاده از روش طیف ظرفیت و روش طیف ظرفیت بهبود یافته تعیین گردید. در ادامه با توجه به نقاط عملکرد محاسبه‌شده، سطح عملکرد هر یک از قاب‌ها، در کلیه‌ی روش‌ها با استفاده از ضوابط FEMA273 [15] تعیین شد. برای به‌دست آوردن نقطه‌ی عملکرد از روش B موجود در ATC40 استفاده گردید اما به‌جای استفاده از فرض ساده‌کننده‌ی این روش که منحنی ظرفیت را به یک منحنی دو خطی تبدیل می‌کند، از منحنی واقعی غیرخطی طیف ظرفیت استفاده شده است. مطابق این روش برای هر نقطه روی منحنی ظرفیت، میرایی معادل (روش طیف ظرفیت) و شکل‌پذیری (روش طیف ظرفیت بهبود یافته) تعیین شد و طیف پاسخ متناظر با هر یک از این مقادیر به‌دست آمدند. سپس شتاب طیفی(Sa) متناظر با تغییرمکان طیفی(Sd) آن نقطه از منحنی ظرفیت به‌دست آمد و نقطه‌ای با مختصات (Sd,Sa) مشخص گردید. مشخصات نقطه‌ی عملکرد در مورد هر نقطه‌ی فرض شده، کنترل شد و نهایتاً عملکرد حقیقی هر سازه مشخص گردید. در شکل‌های

(۹-۵) منحنی ADRS هر یک از قاب‌ها و منحنی موزی شکل [1] مربوط به انجام سعی و خطا برای محاسبه‌ی نقطه‌ی عملکردهر قاب نشان داده شده است. در شکل (۱۰) منحنی میانگین تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بام هر قاب در تحلیل دینامیکی غیرخطی ترسیم شده است (به‌طور مثال برای قاب شماره‌ی (۲)، میانگین تغییرمکان بام ۱۰ رکورد از زلزله‌ی نورتریج ترسیم شده است). در این شکل‌ها μ ضریب شکل‌پذیری، α نسبت سخت‌شدگی، ξ میرایی معادل، ICSM (Improved Capacity Spectrum Method) نشان‌دهنده‌ی روش طیف ظرفیت بهبودیافته و CSM(MethodCapacity Spectrum) نشان‌دهنده‌ی روش طیف ظرفیت می‌باشند. رکوردهای زلزله‌ی در نظر گرفته شده برای هر قاب در جدول (۱) مشخص شده است.

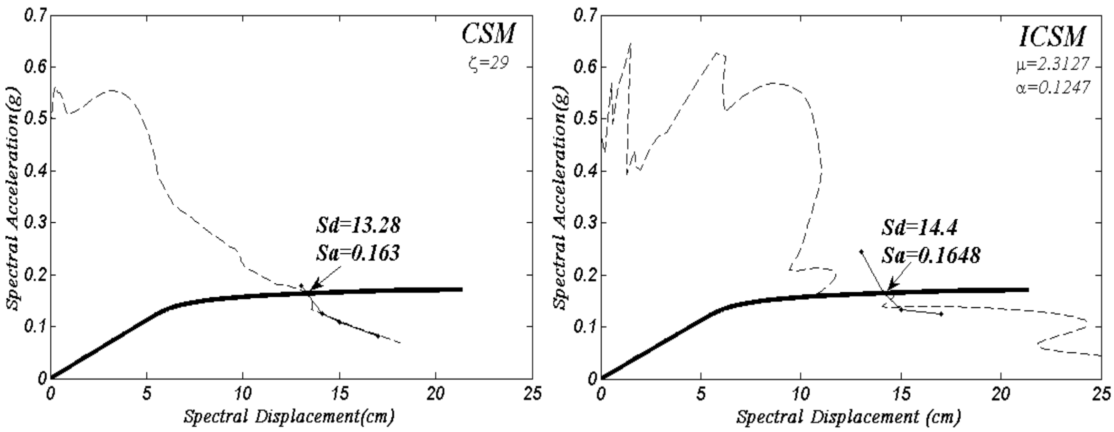
نتایج نشان می‌دهند، مقادیر نقطه‌ی عملکرد محاسبه‌شده با استفاده از دو روش ICSM, CSM در اکثر موارد از نقطه‌ی عملکرد محاسبه‌شده با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی کم‌تر می‌باشد. اختلاف موجود بین نتایج حاصل از روش‌های طیف ظرفیت و طیف ظرفیت بهبود یافته را می‌توان ناشی از پیچیدگی بسیار تحلیل‌های غیرخطی، استفاده از الگوی بارگذاری ثابت در روش استاتیکی غیرخطی، نادیده گرفتن اثرات باربرداری در روش استاتیکی و... دانست. حداکثر اختلاف روش طیف ظرفیت با تحلیل دینامیکی ۲۹/۸ درصد می‌باشد درحالی‌که بیش‌ترین اختلاف روش طیف ظرفیت بهبودیافته با تحلیل دینامیکی ۱۹/۸ درصد می‌باشد. با مراجعه به جدول (۱)، مشاهده می‌شود که در همه‌ی موارد اختلاف بین روش طیف ظرفیت بهبودیافته و تحلیل دینامیکی، نسبت به اختلاف روش طیف ظرفیت و تحلیل دینامیکی، کم‌تر است به‌طوری‌که میانگین اختلاف در روش طیف ظرفیت ۲۲/۴۸ درصد و در روش طیف ظرفیت بهبود یافته ۱۱/۷۵ درصد می‌باشد. اگرچه این روش‌ها تقریبی هستند اما مشاهده می‌شود، میزان اختلاف روش طیف ظرفیت بهبودیافته با تحلیل دینامیکی کم‌تر از روش طیف ظرفیت می‌باشد. تفاوت دو روش «طیف ظرفیت» و «طیف ظرفیت بهبود یافته» به‌دلیل متفاوت بودن مفهوم شکل‌پذیری و میرایی معادل و نحوه‌ی محاسبه‌ی طیف متناظر با این دو مفهوم می‌باشد.



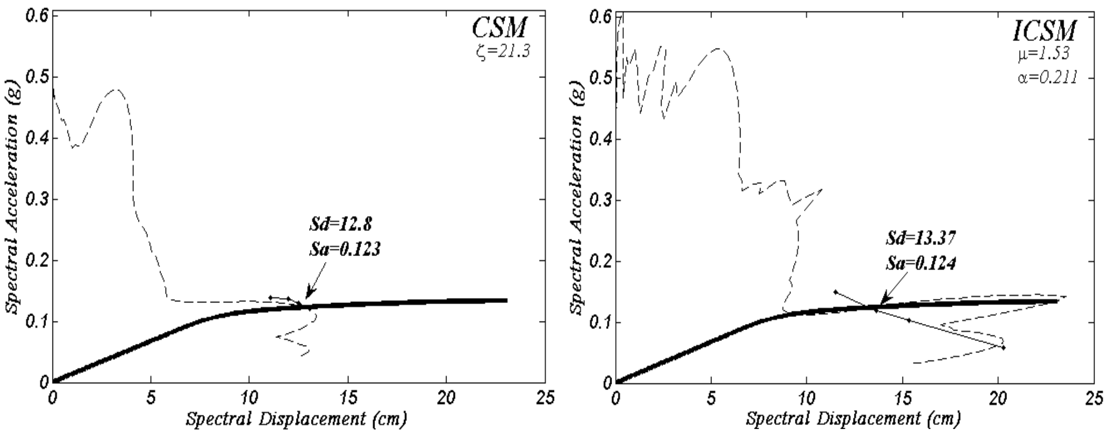
شکل ۵ عملکرد قاب ۳ طبقه با روش طیف ظرفیت بهبودیافته و روش طیف ظرفیت مختصات ADRS



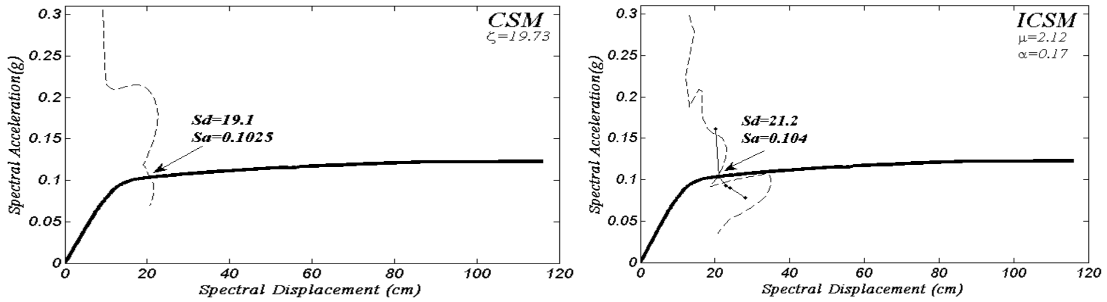
شکل ٦ عملکرد قاب ۵ طبقه با روش طیف ظرفیت بهبودیافته و روش طیف ظرفیت مختصات ADRS



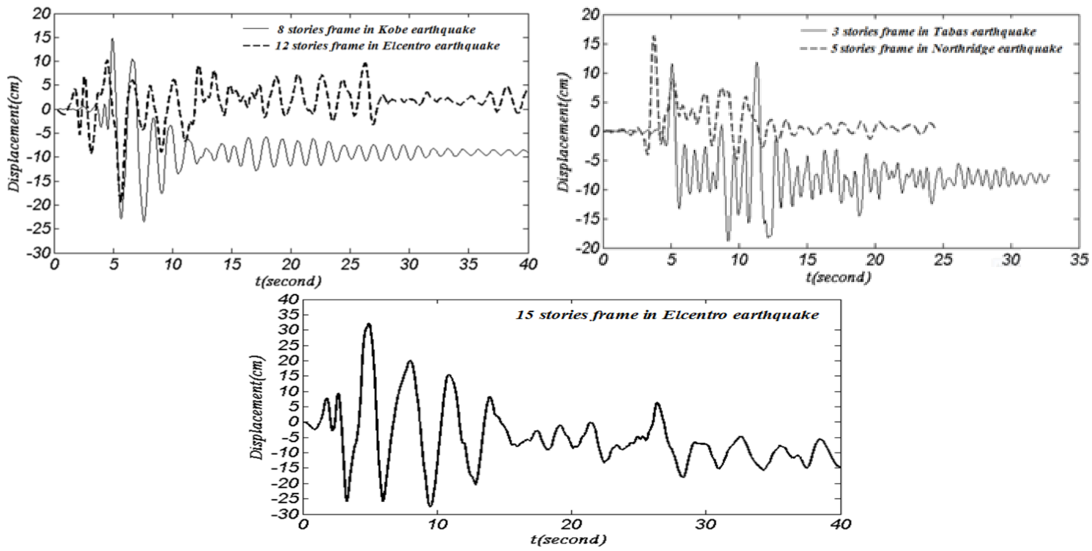
شکل ۷ عملکرد قاب ۸ طبقه با روش طیف ظرفیت بهبودیافته و روش طیف ظرفیت مختصات ADRS



شکل ۸ عملکرد قاب ۱۲ طبقه با روش طیف ظرفیت بهبودیافته و روش طیف ظرفیت مختصات ADRS



شکل ۹ عملکرد قاب ۱۵ طبقه با روش طیف ظرفیت بهبودیافته و روش طیف ظرفیت مختصات ADRS



شکل ۱۰ میانگین تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی بام

جدول ۱ مقادیر جابه‌جایی در نقاط عمل‌کرد مثال‌ها برحسب سانتی‌متر و میزان خطای آن‌ها نسبت به روش دینامیکی غیرخطی

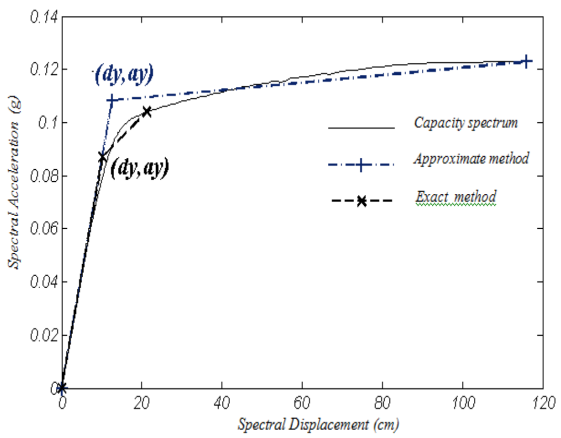
شماره قاب	تعداد طبقات	رکوردهای زلزله در نظر گرفته شده	(۱) تحلیل دینامیکی غیرخطی	(۲) طیف ظرفیت (CSM)	(۳) طیف ظرفیت بهبود یافته (ICSM)	درصد اختلاف (CSM) با تحلیل دینامیکی	درصد اختلاف (ICSM) با تحلیل دینامیکی	(۱) سطح عملکرد وجابه‌جایی نسبی %	(۲) سطح عملکرد وجابه‌جایی نسبی %	(۳) سطح عملکرد وجابه‌جایی نسبی %
۱	۳	طبس	۱۸/۸۵	۱۳/٦٥	۱۷/٤۱	-۲۷/٥۱	-۷/٦٤	۲/۰۹-LS	۱/٥۲-LS	۱/۹۳-LS
۲	٥	نورتریج	۱٦/۲۸	۱۱/٤۲	۱۸/٤۹	-۲۹/۱۸	۱۳/٥۷	۱/۰۱۷-IO	۰/۷۱-IO	۱/۱٦-IO
۳	۸	کوبه	۲۳/٤۹	۱۷/۳۷	۱۸/۸٤	-۲٤/٥۲	-۱۹/۸۱	۰/۹۱-IO	۰/٦۷-IO	۰/۷۳-IO
٤	۱۲	السنترو	۱۹/٤۷	۱۷/۲۸	۱۸/۰٥	-۱۱/۲۷	-۷/۳۲	۰/٥۱-IO	۰/٤٥-IO	۰/٤۷-IO
٥	۱٥	السنترو	۳۲/۲۱	۲٥/۹۸	۲۸/۸۳	-۱۹/۳۲	-۱۰/٤٥	۰/٦۷-IO	۰/٥٤-IO	۰/٦۰-IO

در واقع می‌توان این‌گونه بیان کرد که در روش طیف ظرفیت که از مفهوم میرایی معادل استفاده می‌کند، این‌گونه در نظر گرفته می‌شود که با افزایش بار جانبی در تحلیل بارافزون و ورود سازه به فاز غیرخطی، میرایی سازه افزایش می‌یابد. برای هر نقطه از منحنی ظرفیت، می‌توان میرایی معادل آن نقطه را محاسبه و سپس طیف نیاز مورد نظر را براساس این میرایی معادل مجدد محاسبه نمود که محاسبه‌ی این طیف با انجام تحلیل‌های دینامیکی خطی، قابل انجام است. اما در روش طیف ظرفیت که از مفهوم شکل‌پذیری استفاده می‌کند، این‌گونه در نظر گرفته می‌شود که با افزایش بار جانبی در تحلیل بارافزون و ورود سازه به فاز غیرخطی، شکل‌پذیری سازه افزایش می‌یابد. چوپرا روابطی ارائه نموده است تا بتوان در هر نقطه از طیف ظرفیت، شکل‌پذیری آن نقطه را محاسبه و سپس بتوان طیف نیاز مورد نظر را براساس این شکل‌پذیری مجدداً محاسبه نمود که برای محاسبه‌ی این طیف به انجام چندین تحلیل دینامیکی غیرخطی نیاز می‌باشد.

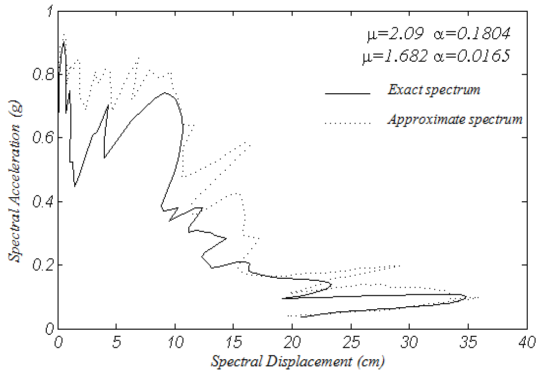
مقایسه‌ی نتایج عددی نشان می‌دهند که روش طیف ظرفیت همواره تخمینی دست پائین از جابجایی نقطه عملکرد ارائه می‌کند که این مسأله چندان مطلوب نیست، چون این تقریب برخلاف تقریب‌های دست بالا، در جهت اطمینان نیست و می‌تواند در طراحی براساس عمل‌کرد، سبب اشتباه شود.

اگرچه محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که روش طیف ظرفیت اصلاح‌شده دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش طیف ظرفیت می‌باشد اما محاسبه‌ی طیف برای یک شکل‌پذیری خاص، نیاز به انجام چندین تحلیل دینامیکی غیرخطی دارد که عملیاتی پیچیده و وقت‌گیر است. اما لازم به یادآوری است آن‌چه در استانداردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، طیف طرح می‌باشد که بسیار یکنواخت‌تر از طیف پاسخ می‌باشد. به‌منظور محاسبه‌ی طیف طرح برای یک شکل‌پذیری خاص، روابطی توسط محققانی چون نیومارک و هال، کراوینکر و نصر، فایفر و ویدیچ، برای کاهش طیف طرح ارائه شده است [11] و در صورت استفاده از این روابط مشکلات محاسبه‌ی طیف غیرالاستیک پیشنهادی چوپرا که مانعی بزرگ برسر راه استفاده از این روش می‌باشد، از میان برداشته خواهد شد. با توجه به این‌که روش موجود در استانداردهای عملکردی مانند ATC40 و FEMA273 روش طیف ظرفیت می‌باشد، به نظر می‌رسد این استانداردها نیاز به بازنگری در این زمینه داشته باشند.

در ادامه برای این‌که نشان داده شود جایگزینی کل طیف ظرفیت با یک منحنی دوخطی که در ATC40 مورد قبول است و در مراجع [11, 12] استفاده شده است تا چه حد می‌تواند در محاسبات، تقریب وارد کند (به خصوص در روش ICSM)، در نقطه‌ای بسیار نزدیک به نقطه‌ی عملکرد در قاب ۱۵ طبقه (روش ICSM) یک‌بار طیف غیرالاستیک با فرض ساده‌کننده (تقریبی) و بار دیگر به‌صورت دقیق محاسبه شده که نتایج در شکل‌های (۱۲ و ۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مقادیر دقیق و تقریبی(فرض دوخطی) نقطه‌ی تسلیم و سایر پارامترها



شکل ۱۲ طیف غیرالاستیک دقیق و تقریبی (فرض دوخطی)

همان‌طور که در شکل‌های مزبور قابل مشاهده است این فرض ساده کننده، سبب تغییر پارامترهای مؤثر هر نقطه بر روی منحنی ظرفیت می‌شود و همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود دو طیف رسم شده برای این نقطه در برخی نواحی دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای هستند که این امر می‌تواند موقعیت نقطه‌ی عملکرد را تحت تأثیر قرار دهد. بسته به این‌که عملکرد سازه در کدام ناحیه‌ی طیف قرار بگیرد این تأثیر می‌تواند زیاد یا کم باشد. در این مثال با توجه به قرارگیری نقطه‌ی عملکرد در محدوده‌ای با اختلاف کم، خطای ایجاد شده حدود ۳ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به ارزیابی دقت دو روش طیف ظرفیت و طیف ظرفیت بهبود یافته جهت تعیین عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی پرداخته شد. به این منظور ابتدا مدل‌سازی غیرخطی چندین سازه تحت اثر زلزله‌های متعددی انجام شد. سپس عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس دو روش مذکور تعیین شد و نتایج حاصل با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه شدند ارزیابی عملکرد قاب‌های مورد مطالعه نشان داد که روش طیف ظرفیت در بیش‌تر موارد به تغییرمکان‌های دست پایین در نقاط عمل‌کردی سازه‌ها، منتهی می‌شوند؛ هرچند که روش طیف ظرفیت بهبود یافته دارای نتایج به‌تری می‌باشد. هم‌چنین نشان داده شد که روش دو خطی کردن منحنی ظرفیت در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، تقریب ایجاد می‌کند.

مراجع

1. Applied Technology Council, ATC40,. "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings" California Seismic Safety Commission, (1997).
2. Freeman, SA., "Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion". Publication SP-55. Detroit (MI): American Concrete Institute; p. 589-605, (1978).
3.Yu Y, Symans MD, Mclean DI, Cofer WF. "Evaluation of analysis methods for assessing seismic response", Transportation research record no. 1688.Washington D.C.: Transportation research Board-National Research Council .p. 163-72, (1999).
4. Habibi, A.R., Moharrami, H. and Tasnimi, A.A. "Evaluation of seismic performance of RCMRF using stiffness damage index", Journal of University College of Engineering, 40, pp. 701–712, (2006).
5. B. Gencturk, S. Elnashai. "Development and application of an advanced capacity spectrum method", Engineering Structures 30, pp. 3345-3354 , (2008).
6. lin Y-Y, Chang K-C, Wang Y-L. "Comparison of displacement coefficient method and capacity

spectrum method with experimental results of RC columns". Earthquake Struct Dyn, 32(13):2013-25, (2003).

7. Akkar SD, Miranda E." Statistical evaluation of approximate methods for estimating maximum deformation demands on existing structures", J Struct Eng, 131(1):160-72, (2005).

8. Bertero VV."Tri-service manual methods". In: Vision 2000. Sacramento: Stractural Engineering Association of California , (1995).

9. Reinhorn AM."Inelastic analysis techniques in seismic evaluations". In: Fajfar P.Krawinker H, editors. Seismic design methodologies for the next generation of codes. Rotterdam: Balkema, pp. 277-87, (1997).

10. Fajfar P.," Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra", Erthq Eng Struct Dyn,28(9):979-93, (1999).

11. Chopra AK, Goel RK," Capacity-demand-diagram-methods for estimating seismic deformation of inelastic structures:SDF Systems", Report No. PEER-1999/02. Berkeley(CA): Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, (1999).

12. Nasim K. Shattarat, Michael D.Symans, David I.McLean, William F.Cofer." Evaluation of nonlinear static analysis methods and software tools for seismic analysis of highway bridges", Engineering Structures 30,pp. 1335-1345, (2008).

13. Chopra AK. "Dynamic of structure: Theory and applications to earthquake engineering", 2^{nd} ed. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, (2001).

14. R. E. Valles, A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath, C. Li4,and A. Madan.. IDARC version 4.0"a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures", Technical Report NCEER-96-0010, National Center For Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, (1996).

15. Federal Emergency Management Agency, FEMA273," NEHRP Guideline for The Seismic Rehabilitation of Building. Building" Seismic Safety Council, Washington DC, (1997).

16. Building and Housing Research Centre, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Standard No. 2800, (1999).

17. Habibi, A.R., "Optimal Seismic Performance-Based Design of Two Dimensional Reinforced Concrete Frames", Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (2006).